Ontario

Commande n° 91-078
Octobre 1991
AGDEX 202
736

Fiche technique

Refroidissement rapide par air pulsé des fruits et légumes frais de l'Ontario

Hugh W. Fraser, Direction de la gestion des ressources

Traduction de la fiche n° 91-070, «Forced-Air Rapid Cooling of Fresh Ontario Fruits and Vegetables», Centre de ressources agro-alimentaires, Collège de technologie agricole et alimentaire d'Alfred

Pourquoi est-il important de refroidir les fruits et les légumes?

Tous les fruits et les légumes frais sont des organismes vivants, même après la récolte, et il faut les maintenir en vie et en bon état jusqu'à leur transformation ou leur consommation. C'est dans leurs propres réserves alimentaires qu'ils puisent l'énergie dont ils ont besoin pour continuer à vivre. Ils convertissent ces réserves en énergie par le phénomène de la **respiration**. Celle-ci s'accompagne d'un dégagement d'énergie excédentaire, sous forme de chaleur, dont la quantité varie selon la sorte de produit, la variété, le degré de mûrissement, l'importance des meurtrissures et la température ambiante. Le résultat final de l'activité respiratoire étant la détérioration et la sénescence, il est logique de chercher à minimiser l'activité respiratoire des produits fraîchement récoltés.

C'est la **température** du fruit ou du légume qui influe le plus sur l'intensité de l'activité respiratoire. Le refroidissement prompt, rapide et uniforme du végétal, c'est-à-dire l'élimination de sa **chaleur de récolte**, est donc indispensable pour en ralentir la détérioration et en prolonger la conservabilité. Le refroidissement a aussi pour effet de réduire :

a) la production d'éthylène et la sensibilité des produits à l'éthylène,
b) la déshydration et la perte de volume qui en résulte,
c) le développement et la propagation des microorganismes,
d) la réponse des produits aux meurtrissures.

En quoi consiste le refroidissement rapide par air pulsé?

Le refroidissement par air pulsé n'est qu'un des procédés utilisés pour extraire rapidement la chaleur de récolte des produits fraîchement rapportés du champ. Il est largement utilisé, depuis des années, par les horticulteurs de la Californie qui ont compris tous les avantages qu'il y avait à éliminer rapidement la chaleur de récolte, puisque leurs produits, destinés à des marchés éloignés, doivent rester frais plus longtemps. Le refroidissement par air pulsé a été mis à l'essai sur de nombreux produits parce qu'il est moins onéreux (comparé au refroidissement par eau glacée), plus rapide (comparé au refroidissement traditionnel en chambre froide), et qu'il est applicable à de nombreux produits différents.

Figure 1 Installation de refroidissement de fraises par air pulsé (Gracieuseté de Joe Wismer, Station de Jordan)

En Ontario, où le refroidissement par air pulsé n'est pas aussi courant, quelques dizaines d'horticulteurs seulement s'en servent pour les fraises (voir figure 1), les pêches et les champignons. Pourtant, d'autres produits de l'Ontario pourraient en profiter.

Le refroidissement par air pulsé repose sur des ventilateurs qui font passer l'air à travers les ouvertures ménagées dans les emballages et le font circuler autour des produits emballés. Il s'avère plus efficace d'«aspirer» l'air à travers les emballages que de le «souffler» car il est alors beaucoup plus facile de réduire au minimum les «courts-circuits» (le retour direct au ventilateur de l'air réfrigéré sans passage près des produits) quand les emballages sont dans une enceinte sous vide. Le but recherché est de contraindre l'air à circuler autour du produit.

C'est le contact intime entre l'air froid et le produit tiède qui entraîne un refroidissement rapide. Lorsque ces emballages sont bien conçus, le refroidissement rapide et uniforme peut être réalisé à l'intérieur de paniers, de bacs, de caisses ou de sacs.

Il ne faut pas confondre refroidissement par air pulsé avec refroidissement en chambre froide. Dans ce dernier cas, l'air réfrigéré ne fait que circuler librement dans la pièce. Comme l'air emprunte naturellement le chemin de la plus faible résistance, rien ne le pousse à pénétrer dans les emballages et à y refroidir les produits chauds. Par conséquent, le refroidissement du produit est essentiellement le résultat de la **conduction**, un processus qui est très lent.

En revanche, avec le refroidissement par air pulsé, l'air réfrigéré est forcé d'entrer dans les emballages à cause du vide qui y est créé par des ventilateurs de forte puissance. Le produit refroidit grâce à l'action **convective** de l'air réfrigéré qui entraîne avec lui l'air chaud.

Au cours d'essais effectués à Vineland en 1991, on a comparé le refroidissement par air pulsé au refroidissement en chambre froide d'une palette de fraises. On a surveillé l'évolution de la température au centre de la palette. La ventilation par air pulsé a mis environ 1 ¼ heure à faire tomber la température des fraises de 20 à 2 °C (de 68 à 36 °F) au centre de la palette (extraction des 7/8 de la chaleur de récolte), alors qu'en chambre froide, il a fallu environ 3 ¾ heures simplement pour que la température des fruits chûte à environ 14 °C (57 °F), au même endroit dans la palette (extraction de 1/4 de la chaleur de récolte)! En chambre froide, on a calculé qu'il faut environ 27 heures pour extraire les 7/8 de la chaleur de récolte, soit 21 fois plus de temps qu'avec le refroidissement par air pulsé!

Quels sont les produits qui se prêtent au refroidissement par air pulsé?

On avait coutume de penser qu'on ne pouvait pas appliquer ce procédé aux produits qui se déshydratent facilement, soit : la laitue, les épinards et les champignons, qui sont refroidis sous vide (dans une enceinte sous vide, l'eau bout à 0 °C ou 32 °F); le brocoli et le maïs sucré, qui sont refroidis par eau, puis recouverts de glace; les asperges et les pêches, qui sont refroidies par eau. Toutefois, des essais ont permis de constater qu'on pouvait aussi refroidir ces denrées par air pulsé à condition que l'opération se fasse rapidement et avec de l'air très humide. (Voir la fiche technique du MAAO *L'humidité dans les entrepôts frigorifiques de fruits et légumes*, AGDEX 202/736.

Le tableau 1 indique la température qu'ont généralement les fruits et les légumes, en Ontario, au moment de la récolte, la température à laquelle il est recommandé de les conserver ainsi que leur chaleur de respiration en fonction de trois températures. La température à la récolte varie largement selon le moment de la journée où se fait la cueillette et selon que le fruit était au soleil ou à l'ombre. Des essais réalisés en juin 1991, dans la région de Vineland, ont montré que la température des fraises sur pied pouvait atteindre plus de 40 °C (104 °F) lorsque celles-ci étaient au soleil!

Plus le légume ou le fruit dégage de chaleur par la respiration, plus il est sujet à la détérioration. Il est clair selon le tableau que le taux de respiration baisse considérablement lorsque le produit est entreposé à la température recommandée. Pour certains produits comme les petits fruits, les asperges, les champignons, le brocoli et le maïs, il faut que le refroidissement commence immédiatement après la récolte et qu'il soit terminé au bout de quelques heures.

Comment le refroidissement par air pulsé est-il réalisé?

Les installations de refroidissement par air pulsé vont du simple dispositif comprenant un ventilateur et un boîtier, qui assure l'aspiration horizontale de l'air à travers quelques palettes de cageots de fraises (voir figure 1), à la chambre de refroidissement séparée, ultra-moderne, dotée d'une console de commande sophistiquée. Il n'en demeure pas moins que toutes les installations (voir figure 2) font appel à des composantes de base identiques :

a) des emballages à ouvertures alignées,

b) des ventilateurs de puissance et de type appropriés,

c) un réseau de gaines (pour le transport de l'air chaud et de l'air froid),

d) un dispositif empêchant le court-circuit du système (retour direct de l'air réfrigéré au ventilateur),

e) un système de commande,

f) un appareil frigorifique de puissance convenable.

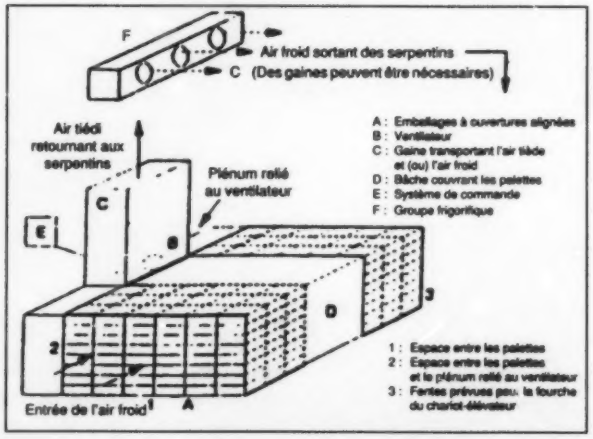

Figure 2 Composantes d'une installation de refroidissement par air pulsé et endroits susceptibles de causer des «courts-circuits» d'air

a) *Emballages à ouvertures alignées*

L'emploi d'emballages à ouvertures suffisamment grandes et bien situées est l'un des facteurs essentiels du refroidissement rapide. En général, l'air réfrigéré est aspiré horizontalement à travers les emballages, mais, au besoin, il est possible de concevoir des installations où l'air est aspiré verticalement. Comme il est **nécessaire** que l'air entre en

contact avec la plus grande surface de produits possible, la superficie des ouvertures doit représenter au moins 5 à 10 % de celle des côtés de l'emballage pour que l'air puisse entrer et sortir. Idéalement, ces ouvertures seraient réparties sur toute la surface du côté par où l'air entre dans l'emballage. La figure 3 montre quelques exemples d'ouvertures différentes dans quatre sortes de cageots de fraises de 8 pintes. On constate que le pourcentage d'ouverture diffère nettement d'un cageot à l'autre.

La position des ouvertures compte pour beaucoup dans l'uniformité du refroidissement. On peut voir par exemple, sur la figure 3, que les ouvertures occupent des **positions** différentes selon les cageots. Dans le cageot du bas, le pourcentage d'ouverture étant de 3 %, le passage offert à la circulation de l'air est limité. Dans le deuxième cageot à partir du bas, le pourcentage est de 7,5 %, ce qui est suffisant, mais les ouvertures se trouvent toutes dans le haut de l'emballage. Les fraises situées au fond des casseaux d'une pinte, à l'intérieur du cageot, risquent de refroidir plus lentement, et le refroidissement manquera d'uniformité.

Figure 3 Cageots de fraises dont les pourcentages d'ouverture différent

En ce qui concerne les deux cageots du dessus, les ouvertures sont grandes et bien réparties. Celles du bord supérieur contribuent à refroidir les fruits du dessus, et celles du bas s'alignent avec les ouvertures des casseaux. Dans ces contenants, les fruits refroidissent plus vite et plus uniformément.

À cause de l'insuffisance et du mauvais emplacement des ouvertures, la plupart des emballages que l'on trouve en Ontario ne se prêtent pas au refroidissement par air pulsé. Il faut souligner que les ouvertures ont une grande incidence sur la solidité de l'emballage, et qu'il est donc important de bien y réfléchir avec l'aide du fabricant.

Le refroidissement se réalise plus vite si les ouvertures sont alignées lorsqu'on empile les emballages sur les palettes. Les emballages tels que les cageots de fraises sont tous rangés dans le même sens sur la palette (voir figure 1), de manière que l'air peut y circuler horizontalement et en ligne droite à travers les ouvertures. Malheureusement, à cause des dimensions d'un grand nombre d'emballages utilisés en Ontario et du fait que, souvent, les emballages sont rangés dans les deux sens, il s'avère pratiquement impossible d'y ménager des ouvertures qui coïncident les unes avec les autres.

L'idéal, pour le refroidissement par air pulsé des emballages qui sont rangés en sens alterné sur les palettes, serait que ces emballages soient 1 ½ fois plus longs que larges et que les ouvertures de la longueur soient alignées sur celles de la largeur durant l'entreposage. La figure 4 montre des caisses de choux qui ont été placées dans les deux sens pour correspondre le mieux aux dimensions de la palette. Ces emballages mesurent environ 60 cm de long sur 40 cm de large (24 po x 16 po), autrement dit le grand côté est 50 % plus long que l'autre. Au-dessous, on voit des caisses ordinaires percées d'un petit nombre d'ouvertures qui ne coïncident avec aucune ouverture de la caisse voisine. En regardant la rangée du dessus, on constate qu'il est possible de «modifier» les caisses en y perçant d'autres ouvertures qui se placeront vis-à-vis des ouvertures des caisses voisines, quel que soit le sens du rangement sur la palette. Les légumes ou les fruits placés dans ces emballages refroidissent plus vite. Malheureusement, il existe peu d'emballages ayant ces dimensions idéales. Les producteurs qui se posent des questions au sujet des dimensions et des ouvertures à donner à leurs emballages devraient en parler avec leurs fournisseurs.

Figure 4 Caisses de choux non ventilées (rangée du bas) et caisses ventilées (rangée du haut) sur une palette (Gracieuseté de Sean Han, Lowbanks)

b) *Type et puissance du ventilateur*

Plus le débit de l'air est élevé, plus le refroidissement est rapide. Cependant, qu'il s'agisse d'un système de refroidissement par air pulsé ou d'un système de refroidissement en chambre froide, les frais fixes et les frais d'exploitation montent en flèche quand on utilise un débit élevé de ventilation. Les ventilateurs de grosse capacité coûtent plus cher à l'achat et au fonctionnement, et les moteurs puissants dégagent dans la pièce une quantité considérable de chaleur qu'il faudra extraire. Idéalement, il faut choisir des ventilateurs

capables de déplacer entre 0,5 et 3 litres d'air à la seconde (L/s) par kilo de produit à refroidir (de 0,5 à 3 pi³/min/lb). Quelquefois, dans les grandes entreprises horticoles, il faut sacrifier quelque peu la vitesse de refroidissement et utiliser des débits plus faibles, simplement parce qu'il en coûterait trop cher de refroidir de grandes masses de produits avec des débits élevés.

Compte tenu de la quantité d'air qui est aspirée à travers le produit et de la difficulté à aspirer cet air (résistance au passage de l'air que le ventilateur doit vaincre), la pression statique de l'air circulant dans le produit varie d'ordinaire de 3 à 25 mm d'eau (0,125 - 1 po), une pression de 12 mm (0,5 po) étant la plus fréquente.

Par exemple, à débit d'air égal, il est plus difficile d'aspirer l'air à travers du maïs sucré stocké dans une cellule qu'à travers des melons stockés dans une cellule de même dimension. Cette difficulté tient à la différence de volume des interstices remplis d'air qui se trouvent entre les fruits ou les grains. On utilise dans le premier cas des ventilateurs centrifuges, dits «à cage d'écureuil», car ils sont conçus pour résister à des pressions statiques élevées.

Supposons une installation (voir figure 1) conçue pour refroidir, par air pulsé, 2 palettes contenant chacune 64 cageots de fraises. En admettant qu'il y ait 5,7 kg (12,5 lb) de fraises par cageot, le poids total des fraises égale 730 kg (1600 lb). Comme le débit de ventilation voulu est de 2 L/s/kg (1,9 pi³/min/lb), il faut choisir un ventilateur capable de déplacer environ 1460 L/s (3100 pi³/min) d'air à une pression statique d'environ 12 mm d'eau (0,5 po). Une telle installation exige donc un ventilateur centrifuge de 0,75 kW (1 hp), entraîné par courroie, coûtant environ 500 $ (1991).

Certains producteurs ont essayé d'utiliser les ventilateurs situés près de l'évaporateur de l'appareil frigorifique pour aspirer l'air directement à travers le produit et le ramener dans les serpentins refroidisseurs. Un tel montage est à déconseiller puisque ces ventilateurs ne sont pas conçus pour résister à des pressions statiques élevées de 12 mm d'eau (0,5 po).

c) *Réseau de gaines*

Il est nécessaire d'installer un réseau de gaines pour :

a) envoyer jusqu'aux produits l'air réfrigéré venant des serpentins refroidisseurs,

b) aspirer jusqu'au ventilateur et aux serpentins l'air qui s'est tiédi au contact du produit.

Ce réseau de gaines peut, dans bien des cas, être construit avec du contreplaqué et (ou) des tunnels de plastique. Les installations simples (figure 1) n'ont pas besoin de gaine, mais les grandes installations (figure 2) peuvent difficilement s'en passer. Toutes les gaines doivent être de section suffisamment large pour appliquer le moins de résistance supplémentaire sur les ventilateurs. Il peut être nécessaire de consulter un ingénieur-conseil dans les situations compliquées.

d) *Comment empêcher le retour direct de l'air*

En matière de refroidissement par air pulsé, une des conditions les plus importantes mais, souvent, une des plus difficiles à respecter, est d'empêcher que l'air amorce son retour avant d'avoir terminé son circuit normal. Étant donné que l'air emprunte toujours le chemin où il rencontre le moins de résistance, il est indispensable d'assurer l'étanchéité de l'installation. En général, la pose d'une large bâche en toile cirée ou plastifiée sur les emballages contribue à obliger l'air à passer à travers le produit dans une seule direction. Les endroits qui posent le plus souvent des problèmes sont les suivants : 1) l'espace entre les palettes; 2) l'espace entre les palettes et le plénum relié au ventilateur; 3) les fentes prévues pour la fourche du chariot-élevateur. (Voir figure 2.)

En se servant d'un manomètre de quelque 50 $, on peut vérifier l'efficacité du calfeutrage des interstices. S'il est bien situé, le manomètre indiquera la différence de pression qui existe entre l'air froid de la pièce et l'air réchauffé du plénum. Le liquide coloré s'élève dans le tube courbe quand la pression statique augmente (figure 5).

Par exemple, après la mise en marche du ventilateur de l'appareil frigorifique, mais avant la pose de la bâche sur les palettes, la différence de pression statique (a, b et c sur la figure 5) égal 0 mm (0 po). Une fois la bâche posée, la différence augmente et peut atteindre 8 mm (0,3 po). Enfin, s'il y avait des endroits qui causaient le retour prématuré de l'air, la différence de pression statique pourrait s'élever à 12 mm (0,5 po) après le colmatage. Cela signifie que le ventilateur travaille plus fort pour aspirer l'air à travers la palette. Les producteurs peuvent déceler les «courts-circuits» d'air en observant le déplacement d'une feuille de cellophane ou d'un mouchoir en papier entraîné par l'air aspiré.

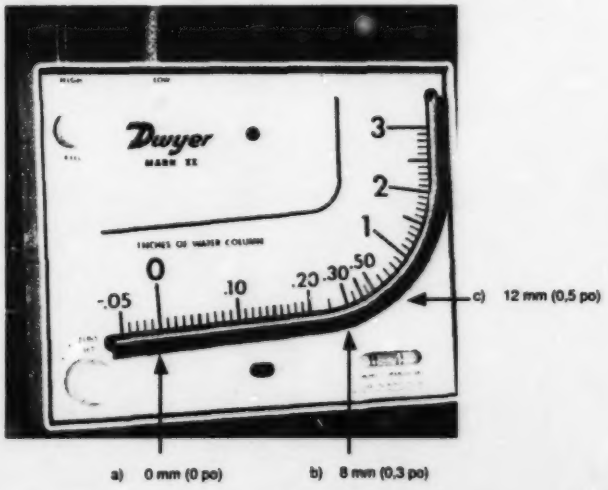

Figure 5 Le manomètre mesure la pression statique.

Dans le cas des paniers ou d'autres emballages largement ouverts sur le haut, il se peut que l'air ne fasse que passer au-dessus des fruits, avec beaucoup de facilité, et que la pression

statique appliquée au ventilateur soit très faible. Il en résulte que l'air raccourcit son circuit et que les fruits des emballages situés plus loin sont mal ventilés. Il est nécessaire de poser un réseau de gaines pour réduire la surface de la section au-dessus des fruits. De cette manière, l'air se trouve en quelque sorte canalisé et forcé de passer plus uniformément au-dessus de tous les paniers. Mais il n'entre pas dans le cadre de la présente fiche technique d'examiner ce genre de dispositif.

e) *Système de commande*

Il faut surveiller à la fois la **durée** de fonctionnement de l'installation frigorifique et la **température du produit**. Cette surveillance s'impose particulièrement au moment de la première mise en service. Après plusieurs utilisations, la plupart des exploitants se seront familiarisés avec la vitesse du refroidissement et les limites de leur matériel, compte tenu de la température des arrivages, de l'air de la pièce, et de la quantité de produit à refroidir. Les exploitants d'entrepôts peuvent vérifier avec rapidité et précision la température du produit grâce à des sondes de température à affichage numérique. Il est conseillé de mesurer la température en plusieurs endroits pour s'assurer de l'uniformité du refroidissement.

La surveillance constante de la température de l'air avant son contact avec le produit et de l'air à la sortie du ventilateur est une des méthodes qui permet de calculer la vitesse du refroidissement. L'arrêt des ventilateurs peut être déclenché soit par des thermostats (dès que l'air de sortie atteint une température fixée), soit par une minuterie (au bout d'un laps de temps déterminé). Un tel dispositif assure le refroidissement automatique des produits malgré l'absence de l'exploitant.

f) *Appareil frigorifique*

Le refroidissement par air pulsé exige une forte capacité de réfrigération à cause de la vitesse à laquelle la chaleur est extraite. Prenons l'exemple de deux palettes de fraises pesant 730 kg (1600 lb); normalement, pour abaisser leur température de 30 à 2 °C (de 86 à 36 °F) en 12 heures, il faut une capacité d'élimination de la chaleur d'environ 1800 W (6150 BTU/h ou 0,5 tonne), si l'on ne tient pas compte de la chaleur s'infiltrant dans la pièce et venant d'autres sources. Le refroidissement du même poids de fraises en 2 heures seulement exige une capacité de réfrigération jusqu'à six fois plus grande. Dans les entrepôts dont la capacité de refroidissement est insuffisante, la température ambiante augmentera, et le refroidissement sera retardé. En outre, le réchauffement de la pièce risque d'élever la température des autres produits frais qui s'y trouvent.

Les moteurs des ventilateurs dégagent de la chaleur qui doit être également éliminée par l'appareil frigorifique. Par exemple, l'ajout d'un ventilateur de refroidissement de 750 W (1 hp) oblige à augmenter la capacité de réfrigération de 865 W (2950 BTU/h ou 0,25 tonne).

Autres considérations

En Ontario, les producteurs de fruits et de légumes sont de plus en plus nombreux à utiliser le refroidissement par air pulsé. Si leurs méthodes diffèrent, leur objectif reste le même : faire en sorte que l'air réfrigéré circule là où ils le veulent, de manière à **extraire rapidement et uniformément la chaleur de récolte des fruits et des légumes sans les déshydrater**.

Tableau 1 Évolution approximative de la chaleur de respiration de certains fruits et légumes frais de l'Ontario en fonction de trois températures différentes

	Température à la récolte	Température de conservation	Chaleur de respiration approximative[1,2,3] J/(kg·h)		
	°C	°C	0 °C	15 °C	25 °C
*Asperge	10-25	0	585	1950	4500
Bleuet	15-30	0	95	390	1100
*Brocoli	15-30	0	215	2450	7700
Cerise (douce)	15-30	0	50	375	500
Champignon	17-20	0	340	2050	3500
Chou (hâtif)	15-30	0	60	240	600
Chou-fleur	5-20	0	190	490	1200
*Épinard	10-30	0	220	1900	2700
Fraise	15-30	0	160	870	2020
Framboise	15-30	0	230	980	2300
*Laitue (feuilles)	10-30	0	250	670	1560
*Laitue (pomme)	15-30	0	120	410	875
*Maïs (avec spathes)	15-30	0	440	1740	3825
Melon brodé	15-30	0-7	60	385	710
Melon miel	15-30	7-10	-	150	325
Pêche	15-30	0	55	400	1100
Poire (Bartlett)	10-25	-1	25	130	525
Poivron	15-30	7-10	-	415	600
Pomme (hâtive)	15-30	0	40	290	425
Prune	15-30	0	25	130	525
Raisin (*Vinifera*)	10-25	0	20	115	295
Tomate (mûre)	15-30	10	-	285	455

** Refroidissement par air pulsé plutôt rare; d'autres essais en vraie grandeur sont nécessaires.*

1. *Agriculture Canada, Publication 1532/F*, Entreposage commercial des fruits et des légumes, *1988*.
2. *Agriculture Canada, Publication 1822/F*, Code canadien de construction des bâtiments agricoles, *1988*.
3. *USDA Handbook 66*, The Commercial Storage of Fruits, Vegetables and Florist and Nursery Stocks, *1968*.

Les chiffres ci-dessus sont des moyennes estimatives établies à partir des diverses sources citées plus haut et ne doivent servir qu'à titre comparatif.

Pour convertir en mesures impériales :

$$°F = (°C \times 9/5) + 32$$

$$BTU/(lb \cdot h) = J/(kg \cdot h)/2330$$

Nous tenons à remercier le Secrétariat d'État pour sa contribution financière à la réalisation de ce document.

IM
ISSN 0836-1053
Also available in English